

# ВЛИЯНИЕ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКИ РАСПЛАВА И МЕГАПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AlCoCrCuFeNi

*Ивченко М.В.<sup>1</sup>, профессор, д.ф.м.н. Пушин В.Г.<sup>1</sup>,  
Wanderka N,<sup>2</sup> Макаров В.В.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup>Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy, Berlin, Germany,

**MVIvchenko@yandex.ru**

В данной работе было исследовано влияние быстрой закалки расплава (методами спиннинга и сплэтинга (скорость охлаждения расплава  $\sim 10^5$  и  $10^6$  К/с соответственно)) и мегапластической деформации под давлением на структуру и свойства высоко энтропийных сплавов системы AlCoCrCuFeNi.

В последние годы исследователи все большее внимание обращают на так называемые высокоэнтропийные сплавы. На рисунке 1 показана зависимость энтропии смешения от количества химических элементов в эквимольном сплаве. При наличии по крайней мере четырех- пяти металлических элементов с близкими атомными радиусам эти сплавы состава, близкого к эквиатомному, способны образовать фазы на основе твердых растворов замещения с ОЦК или ГЦК кристаллической структурой и отличаются благоприятным комплексом свойств (таких, как твердость, прочность, жаропрочность, термическая устойчивость метастабильных дисперсионно упрочненных структурных состояний) [1-3].

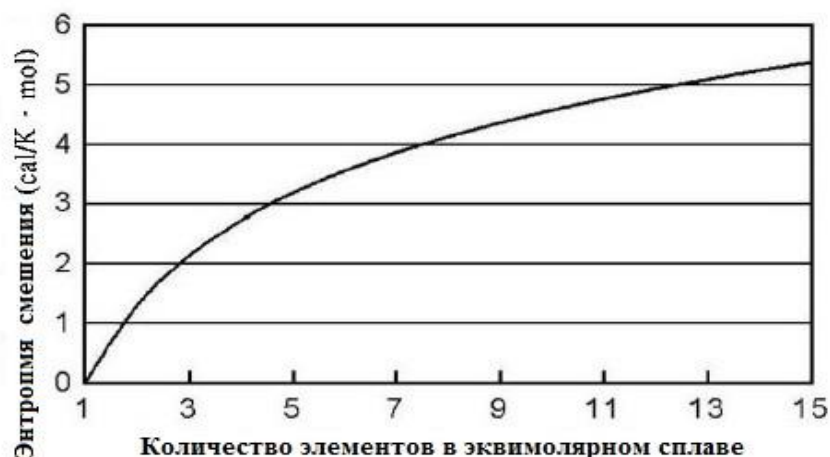


Рисунок 1 Приращение энтропии смешения к числу элементов в эквимольных сплавах в разупорядоченном состоянии[2]

Высокоэнтропийные шестикомпонентные эквиатомные сплавы состава AlCoCrCuFeNi были получены методами сверхбыстрой закалки расплава (БЗР) сплэтингованием и спиннингованием в виде плоских тонких

фрагментов пластин или лент. Образцы БЗР (методом спиннинга) подвергались мегапластической деформации под давлением 6 ГПа в 5 оборотов.

Исследования структуры сплавов проводили методами просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, атомной томографии, рентгенодифрактометрически. Измеряли также измеряли их физико-механические свойства.

Установлено, что применение БЗР (методом сплэтинга) обеспечивает в полученных поликристаллических сплавах образование атомноупорядоченного по типу В2 твердого раствора с практически однородным распределением всех элементов в пределах зерен. При дальнейшей термообработке (отпуске  $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2 и 5 часов и  $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 2 часа) сплавы испытывают распад с выделением нанофаз с упорядоченной по типу В2 решеткой. Применение БЗР (методом спиннинга) и последующая термообработка в виде отпуска ( $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T=650\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течении 2 часов) также обеспечивает образование нанофаз, однако, кристаллические решетки фаз упорядочены по типу В2 и  $L1_2$ , и неупорядочены по типу А1.

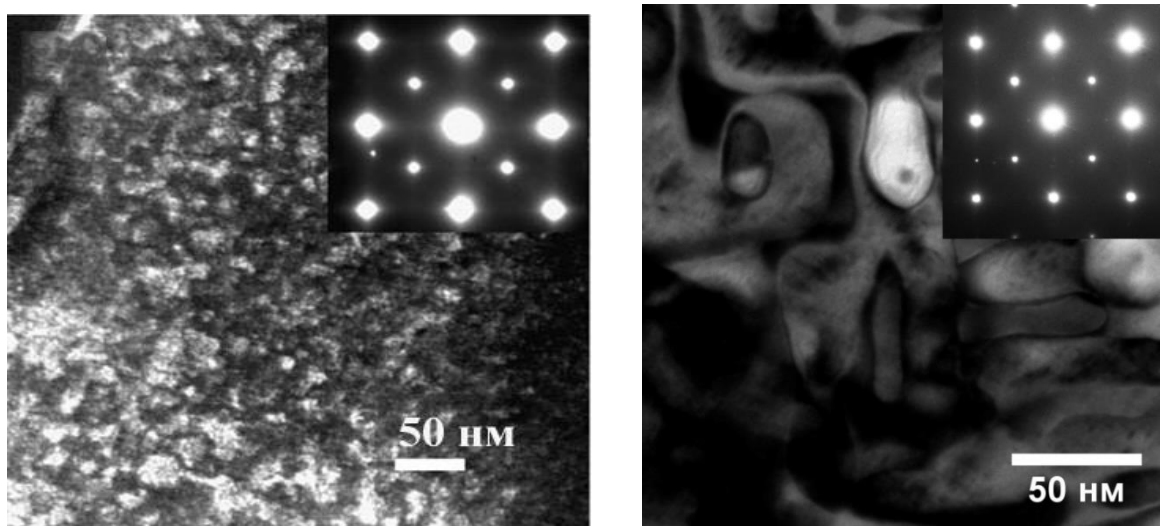


Рисунок 2 Типичные электронномикроскопические изображения БЗР методом сплэтинга и спиннинга, полученные методом ПЭМ с микроэлектронogramмами на вставках

Таким образом, установлено, при затвердевании в условиях сверхбыстрого охлаждения по методу сплэтинга ( $V_{\text{quench}} \approx 10^6\text{ K/s}$ ) в сплаве формируется однородная ультрамелкая субмикроструктурная зеренная ОЦК-структура без образования дендритов или фаз с иным, кроме ОЦК, структурным типом. После закалки из расплава методом спиннинга ( $V_{\text{quench}} \approx 10^5\text{ K/s}$ ) образуется промежуточная по своей морфологии и типу структура, тогда как механические свойства более близки к БЗР-сплав, полученному методом сплэтинга. Ранее формирование таких фаз и структурных

составляющих в данных сплавах, полученных обычными методами кристаллизации, не наблюдалось.

Обнаружено, что твердость и модуль упругости БЗР (методом сплэтинга) высокоэнтропийного сплав после отпуска при 550°C возрастают в два раза, в отличие от исходного быстрозакаленного, а БЗР (методом спиннинга) даже после термообработки незначительно изменяется. Кроме того, обнаружено, что сплав обладает низкой ползучестью после отпуска.

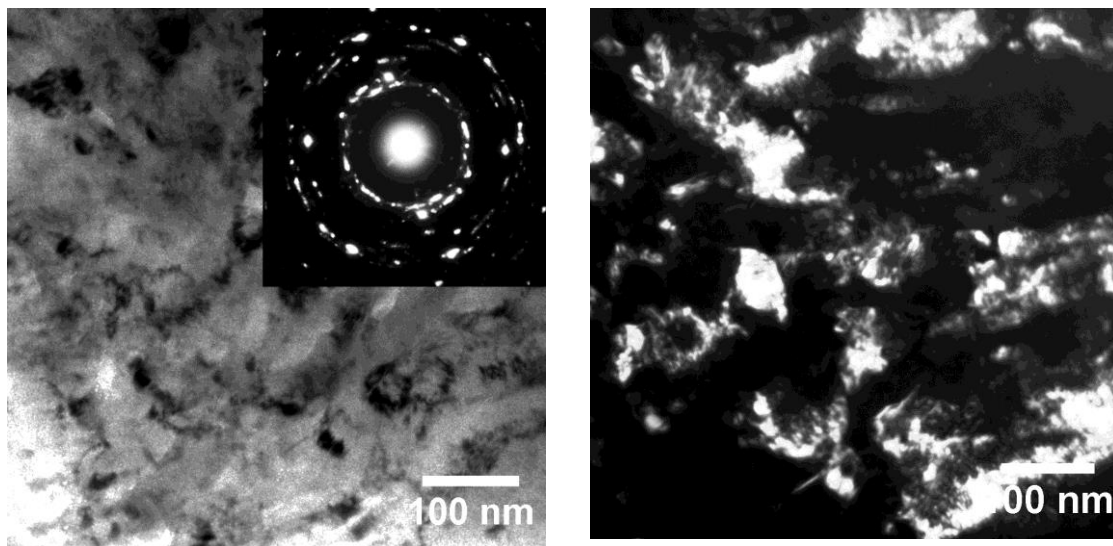


Рисунок 3 Типичные электронномикроскопические изображения БЗР методом спиннинга, после МПД, полученные методом ПЭМ с микроэлектронограммой на вставке

Результаты исследования фазового состава структуры, рентгенограмм и механических свойств сплава указывают на то, что после МПД произошло значительное измельчение всей структуры до наномасштаба, однако, структура остается наномногофазной, и повышение твердости до 1200 кгс/мм<sup>2</sup> (~в 1,5 раза относительно исходного БЗР(методом спиннинга)сплава).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 13-02-96012

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Wanderka, N. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy / N. Wanderka, S.Singh, U. Glatzel, J. Banhart // ActaMaterialia. - 2011. – V.59. - P. 182-190.
2. Yeh, J.-W. High-Entropy Alloys – A New Era of Exploitation / J.-W. Yeh, Y.-L. Chen, S.-J. Lin // Materials Science Forum. - 2007. - V.560. - P.1-9.
3. Wang, X.F. Novel microstructure and properties of multicomponent CoCrCuFeNiTi<sub>x</sub> alloys / X.F. Wang, Y. Zhang, Y. Qiao, G.L. Chen // Intermetallics. -2007. – V.15. - P. 357-362.